

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Studium senzorických vlastností Braggovské mřížky v  
závislosti na různých hodnotách předepnutí**

**Study of Sensory Properties of Fiber Bragg Gratings in  
Dependence on Different Pre-Strain Values**

**2015**

**Vojtěch Stoniš**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Vojtěch Stoniš**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Studium senzorických vlastností Braggovské mřížky v závislosti na  
různých hodnotách předepnutí  
Study of Sensory Properties of Fiber Bragg Gratings in Dependence on  
Different Pre-Strain Values

Zásady pro vypracování:

1. Popis základních vlastností Braggovské mřížky.
2. Popis principu funkce laditelného laseru.
3. Realizace experimentální sestavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí.
4. Vyhodnocení experimentálních měření s ohledem na změnu předepnutí mřížky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] WEBER, M. J. *Handbook of Lasers (Laser & Optical Science & Technology)*. CRC Press, 2000. 1224 p. ISBN 978-0849335099.
- [2] OTHONOS, Andreas, KALLI, Kyriacos. *Fiber Bragg Gratings*. Artech House, 1999. 433 p. ISBN 978-0890063446.
- [3] CHANG, W. S. C. *Principles of Lasers and Optics*. Cambridge University Press, 2007. 260 p. ISBN 978-0521645355.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. května 2015

Stojis  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych moc poděkoval Ing. Petru Šiškoví, Ph.D za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Stanislavu Kepákovi, Ing. Jakubu Čubíkovi a Ing. Marcelu Fajkusovi za jejich věcné rady a připomínky k praktické části mé práce.

A zvláště bych chtěl poděkovat své rodině za její podporu po celou dobu mého studia.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce pojednává o senzorických vlastnostech Braggovské mřížky při měření vibrací. Cílem bylo ověřit, jak FBG mřížka reaguje při daném předepnutí na vibrace a s jakou citlivostí. V teoretické části jsou popsány mřížky obecně, dále jejich rozdělení a využití v praxi. Jsou zde uvedeny také metody výroby. Dále je čtenář seznámen s laserovým zdrojem a jeho variantou laditelného laseru a jeho variantách. Praktická část byla nejprve věnována měření spektra Braggovské mřížky při různých hodnotách předepnutí. Tímto bylo ověřeno, že mechanické předepnutí způsobuje posunutí spektra o několik nanometrů. Následně bylo provedeno vlastní měření, ve kterém bylo ověřeno vibrační působení na již předepnutou mřížku.

## **Klíčová slova**

Braggovská mřížka, laditelný laser, optická mřížka, soustava pro napínání optických vláken, vlnová rovnice, měření vibrací.

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with the sensory properties of Bragg grating used in vibration measurements. The aim was to check how Bragg grating responds when the pretension to vibration and with what sensitivity. The theoretical part is focused at grid description in general, their division and utilization in practice. It also contains methods of production. Furthermore, the reader is familiar with a laser sources and in more detail with the tunable lasers, as this optical source was used in experiment. In the practical part was at first measured the optical spectrum of Bragg gratings at different preloads. That experiment showed that the mechanical preload causes displacement spectra of several nanometers. Then was performed the measurement, in which was also verified the vibrational effect on the already biased grid.

## **Key words**

Fiber Bragg Grating, Tunable Laser Source, optical grating, system for tensioning the optical fiber, wave equation, vibration measurements.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
f	Hz	Frekvence
F	N	Síla
λ	nm	Vlnová délka
Λ		Periodicita mřížky

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>FBG</b>	Fiber Bragg Grating, braggovská mřížka
<b>LPG</b>	Long Period Grating, mřížka s dlouhou periodou
<b>Ti</b>	Titan
<b>CW</b>	Continuous Wave, postupná vlna
<b>UV</b>	Ultra violet, ultrafialové
<b>WDM</b>	Wave Division Multiplex, vlnově dělený multiplex
<b>DWDM</b>	Dense Wave Division Multiplex, hustý vlnově dělený multiplex



# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Popis základních vlastností Braggovské mřížky .....	- 2 -
1.1 Optická mřížka obecně.....	- 2 -
1.1.1 Mřížka s dlouhou periodou (LPG) .....	- 2 -
1.1.2 Mřížky s krátkou periodou (FBG).....	- 2 -
1.2 Optická vlákna s mřížkou.....	- 3 -
1.3 Fotosenzitivita .....	- 3 -
1.4 Typy Braggovských mřížek .....	- 4 -
1.4.1 Uniformní FBG .....	- 4 -
1.4.2 Apodizovaná FBG.....	- 4 -
1.4.3 Chirped FBG .....	- 5 -
1.4.4 Blazed FBG .....	- 6 -
1.5 Výroba Braggovských mřížek.....	- 6 -
1.5.1 Vnitřní zapisování .....	- 6 -
1.5.2 Boční zapisování .....	- 7 -
1.5.3 Metoda zapisování pomocí fázové masky.....	- 8 -
1.5.4 Metoda šikmé mřížky .....	- 8 -
1.5.5 Metoda jednorázového zápisu mřížky .....	- 9 -
1.5.6 Metoda zapisování během vytahování z preformy.....	- 10 -
1.5.7 Metoda zapisování bod po bodu.....	- 10 -
1.6 Aplikace optických mřížek.....	- 11 -
2 Popis principu funkce laditelného laseru.....	- 12 -
2.1 Laser .....	- 12 -
2.2 Rozdělení laserů .....	- 12 -
2.3 Laditelný laser .....	- 13 -
2.4 Základní typy laditelných laserů .....	- 13 -
2.5 Laditelný laser EXFO FLS-2600B.....	- 13 -
2.5.1 Některé vybrané parametry laditelného laseru FLS-2600B .....	- 14 -

3	Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí .....	- 15 -
3.1	Ověření posunu spektra braggovské mřížky při různých předepnutí .....	- 15 -
3.1.1	Schéma měření a použité součásti .....	- 15 -
3.1.2	Nastavené parametry a postup měření .....	- 15 -
3.1.3	Naměřené hodnoty a výsledné grafy .....	- 16 -
3.1.4	Závěr .....	- 16 -
3.2	Měření vibrací pomocí braggovské mřížky v závislosti na předepnutí .....	- 17 -
3.2.1	Schéma měření a příprava pracoviště .....	- 17 -
3.2.2	Použité součásti, postup měření .....	- 18 -
3.2.3	Naměřené hodnoty, grafy .....	- 19 -
3.2.4	Závěr .....	- 26 -
4	Vyhodnocení experimentálních měření s ohledem na předepnutí mřížky .....	- 27 -
4.1	Odvození rovnice pro výpočet harmonických frekvencí .....	- 27 -
4.2	Porovnání naměřených hodnot od výpočtů .....	- 28 -
	Závěr .....	- 31 -
	Použitá literatura .....	- 32 -
	Seznam příloh .....	- 33 -

## Úvod

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, jakou odezvu vykáže braggovská mřížka při různých hodnotách předepnutí vystavená působení vibrací.

V první kapitole je uveden stručný úvod do historie mřížek. Ty jsou dále rozděleny podle typů a následně popsány. Následuje využití mřížek v optoelektronice a optických komunikacích a jejich aplikace. V závěru první kapitoly jsou představeny základní typy Braggovských mřížek a metody výroby.

V následující části je přiblížen popis principu funkce laditelného laseru. Úvodem je popsán laserový zdroj obecně a také princip jeho činnosti. V další podkapitole je základní rozdělení laserů dle jejich aktivního prostředí. Nadále je popsán laditelný laser jeho možnosti a taky základní typy a rozdíly ve srovnání s klasickým laserem. Na závěr kapitoly je popsán laditelný laser od firmy EXFO FLS-2600B. Jsou zde uvedeny jeho základní parametry a možnosti využití.

Předposlední kapitola se věnuje samotné přípravě měřicí soustavy a samotnému experimentu. Jsou popsány jednotlivé komponenty v experimentální sestavě, postupy a naměřené hodnoty. V grafických výstupech jsou zaznačeny důležité výsledky související s následným vyhodnocením měření.

V závěru jsou uvedeny postřehy a shrnutí o získaných poznatcích a jejich možné další využití.

# 1 Popis základních vlastností Braggovské mřížky

## 1.1 Optická mřížka obecně

Optická mřížka je struktura vytvořená uvnitř optického vlákna, která vzniká působením světla ze světelného zdroje na jádro optického vlákna a tím je dosažena změna indexu lomu v jádře optického vlákna. Mřížky se dělí do dvou základních skupin, které si v následujících kapitolách představíme:

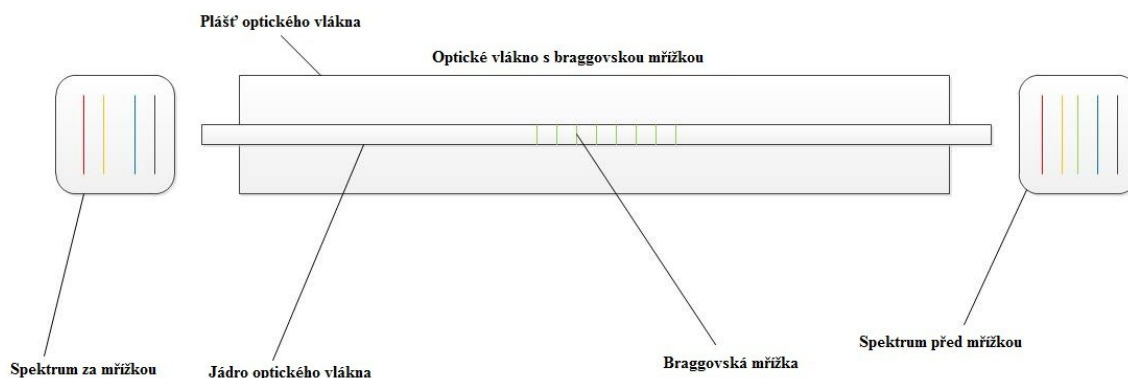
- a) Mřížky s dlouhou periodou LPG (Long Period Grating)
- b) Mřížky s krátkou periodou – častěji označované jako braggovské mřížky (Fiber Bragg Grating)

### 1.1.1 Mřížka s dlouhou periodou (LPG)

LPG umožňuje spojování vidů jádra optického vlákna s vidy v plášti. Perioda u tohoto typu mřížek se pohybuje v rozmezí 100  $\mu\text{m}$  až 1 mm. Přenosové spektrum optického vlákna obsahuje sérii útlumových pásem soustředěných na diskretní vlnovou délku. Každé toto pásmo odpovídá spojení s odlišným módem v plášti optického vlákna. Mezi tyto mřížky se řadí např. chirped mřížky a blazed mřížky. LPG mřížky se využívají převážně v oblasti sensoriky. Existuje celá řada senzorů s LPG jako např. teplotní, tlakové, ohybové, senzor indexu lomu a jiné.

### 1.1.2 Mřížky s krátkou periodou (FBG)

Jsou mřížky, které se nejčastěji označují jako braggovské mřížky. Vyznačují se periodickou změnou indexu lomu podél vlákna, které lze dosáhnout za pomoci UV záření. Perioda nám určuje, jakou vlnovou délku daná braggovská mřížka odráží. Tato permanentní změna je umožněna díky jevu zvanému fotosenzitivita, který má vliv na tvorbu mřížek v jádrech optických vláken.

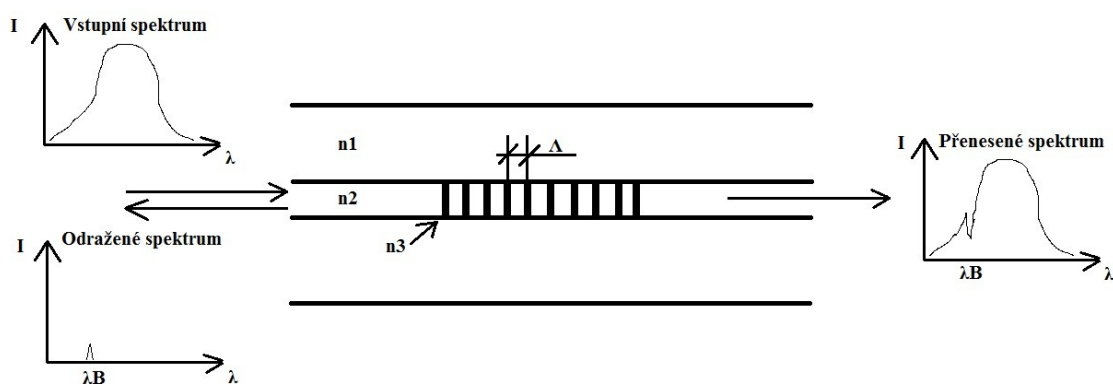


Obrázek 1.1: Optické vlákno s braggovskou mřížkou.

## 1.2 Optická vlákna s mřížkou

Optické vlákno s mřížkou se vyznačuje periodickou změnou indexu lomu v jádře optického vlákna. Na obrázku 1.2 je takové vlákno vyobrazeno. Světlo je u těchto vláken navázáno do jádra optického vlákna a je následně odraženo, pokud je jeho vlnová délka rovná tzv. braggovské vlnové délce. V opačném případě je paprsek přenesen přes mřížku.

Na následujícím obrázku je popsán princip FBG: do FBG vlákna vstupuje spektrum s různou změnou vlnové délky. Na rozhraní indexu lomu jádra ( $n_2$ ) a rozhraní indexu lomu braggovské mřížky ( $n_3$ ) dochází k průchodu spektra a vlnová délka braggovské mřížky je ze spektra odražena. Na výstupu sledujeme pozmeněné spektrum. V místě, kde se nacházela odražená vlnová délka pozorujeme útlum.



Obrázek 1.2: Princip optického vlákna s Braggovskou mřížkou.

Braggovská vlnová délka je dána následujícím vztahem

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

kde  $n_{eff}$  je efektivní index lomu,  $\lambda_B$  je odražená vlnová délka a  $\Lambda$  je periodicitu mřížky.

## 1.3 Fotosenzitivita

Fotosenzitivita optického vlákna byla objevena roku 1978 v kanadském výzkumném centru komunikací Kenem Hillem a spol. Během svých pokusů pracovali s křemíkovými vlákny dopovanými germaniem a argonovým laserem s vlnovou délkou 488 nm a došli k poznatku, kdy při dlouhém působení laserového světla došlo ke zvýšení útlumu v jádře vlákna. To mělo za následek vytvoření interferenční oblasti uvnitř optického vlákna, která odrážela světlo při jedné konkrétní vlnové délce – braggovské vlnové délky. Hill popsal tento jev jako efekt nazývaný jednoduše fotosenzitivita.

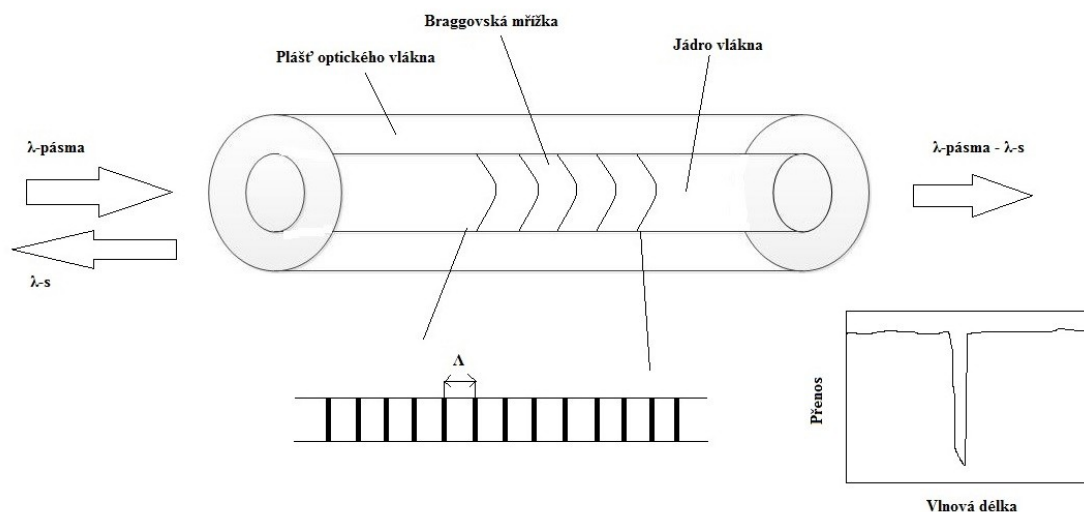
Během další dekády neměla fotosenzitivita široké uplatnění v oblasti průmyslu. Až roku 1989 došlo k objevení zápisu na mřížku optického vlákna ultrafialovým zářením, které otevřelo fotosenzitivě široké možnosti technického využití. Braggovské mřížky začaly být využívány v medicíně, vojenství, ale především našli největší uplatnění v telekomunikacích jako kompenzátory disperze v systémech WDM, je součástí téměř každé polovodičové laser diody a má i mnoho dalších využití.

### 1.4 Typy Braggovských mřížek

Mezi nejzákladnější typy braggovských mřížek používaných v optických vláknech patří níže uvedené typy.

#### 1.4.1 Uniformní FBG

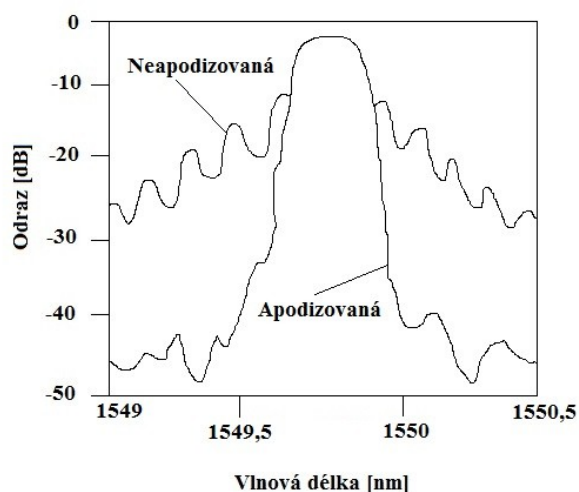
Uniformní braggovská mřížka se vyznačuje pravidelnými změnami indexu lomu v jádře optického vlákna. Přičemž periodicitu změn uvnitř FBG musí být konstantní. U vlnových délek nižších než braggovská vlnová délka dochází ke strukturálnímu přenosu. Odrazivost FBG závisí na délce mřížky, na rozdílech indexu lomu a na vlnové délce, která mřížkou prochází. V odraženém spektru mřížky pak lze sledovat braggovskou vlnovou délku.



Obrázek 1.3: Schéma uniformní FBG. Ve spektru na konci vlákna můžeme pozorovat braggovskou vlnovou délku.

#### 1.4.2 Apodizovaná FBG

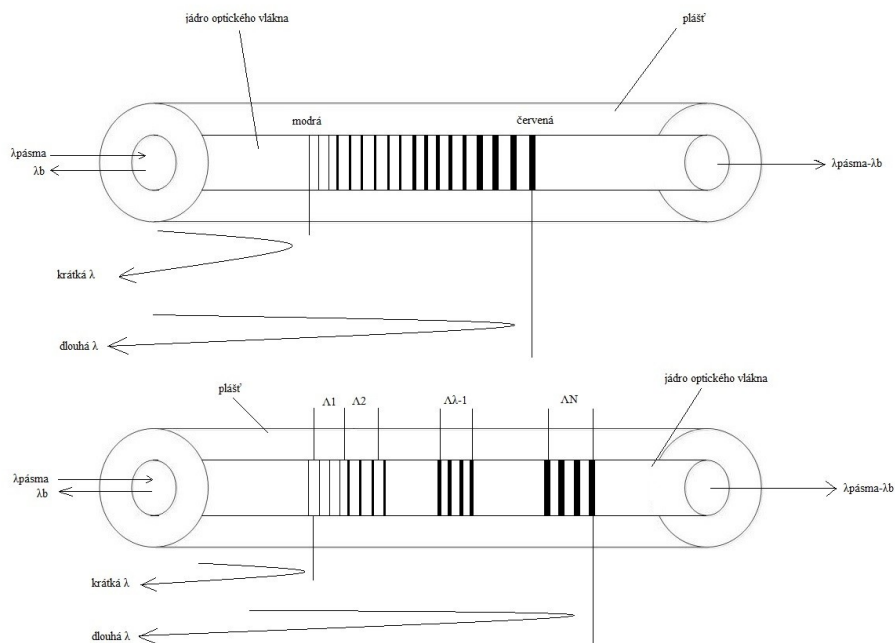
Vzniká ze spektra uniformní FBG s postranními laloky. Tyto laloky však jsou oproti uniformní FBG eliminovány (apodizovány). Potlačení laloků docílíme postupným zmenšováním změn indexu lomu na konci mřížky.



Obrázek 1.4: Spektrum apodizované FBG. Na obrázku je jasně vidět potlačení postranních laloků.

### 1.4.3 Chirped FBG

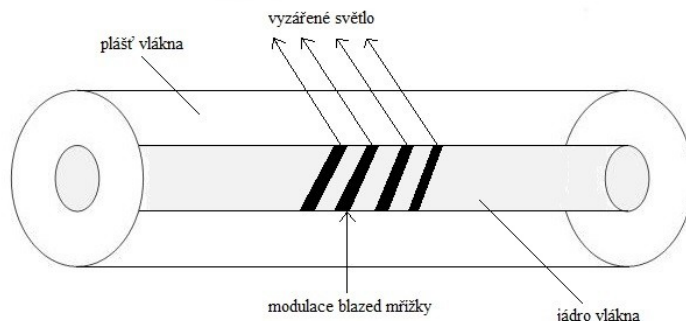
Tento typ FBG se vyznačuje monotónní změnou vzdálenosti mezi změnami indexu lomu. Nejtypičtější příkladem budiž lineární změna periody indexu lomu. Tento druh se nejčastěji používá pro kompenzaci chromatické disperze v telekomunikacích.



Obrázek 1.5: Schéma chirped FBG. Z obrázku lze vyvodit, že delší vlnové délky putují v jádře optického vlákna dále než kratší vlnové délky.

#### 1.4.4 Blazed FBG

Braggovské mřížky tohoto typu vznikají jejich nakloněním v určitém úhlu. Ve výsledku dochází k vyvázání světla do pláště optického vlákna.



Obrázek 1.6: Schéma blazed FBG.

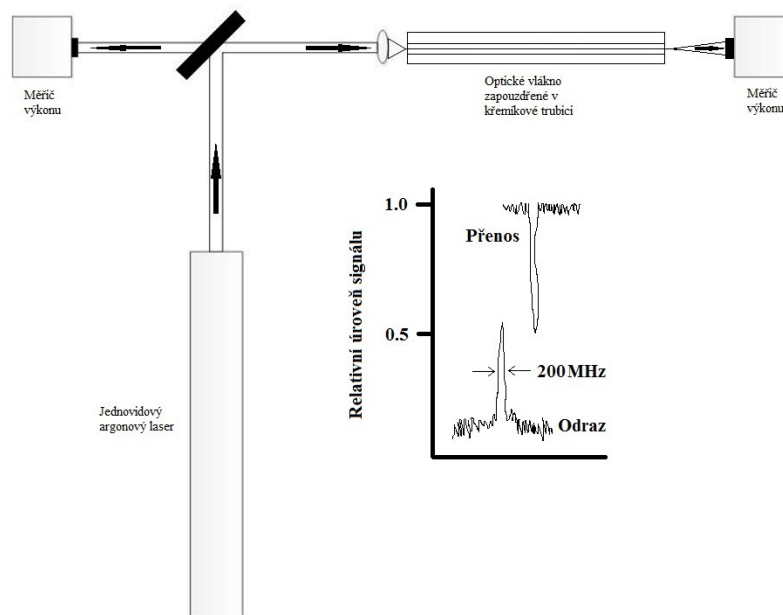
### 1.5 Výroba Braggovských mřížek

Při výrobě braggovských mřížek se využívá křemíkových vláken dopovaných germaniem. Ta jsou při výrobě mřížky vystavená UV záření a musí proto obsahovat velké množství prvků germania. V současné době je známo několik druhů zapisování mřížek do optického vlákna.

#### 1.5.1 Vnitřní zapisování

Tento způsob zapisování objevil v roce 1978 Ken Hill spolu se svými kolegy. Při pokusech použili argonový laser o vlnové délce 488 nm a tím vytvořili v jádře vlákna interferenční oblast, která odrážela světlo o vlnové délce laseru. Tato vlnová délka se nazývá braggovská vlnová délka. Interferenční oblast je způsobena odrazem světla, které je navázáno do vlákna s odrazy světla z Fresnelových odrazů.





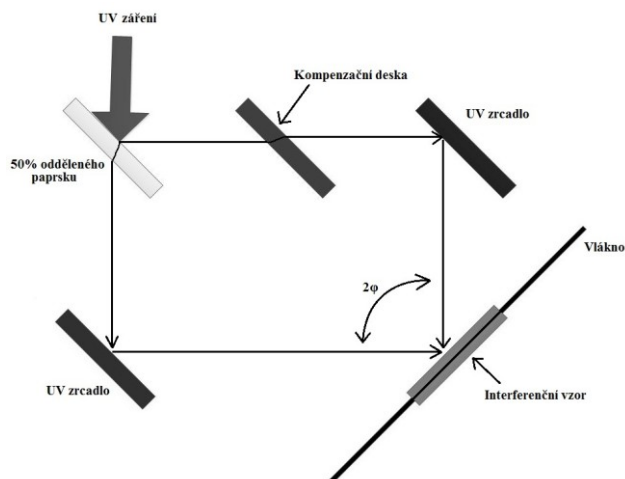
Obrázek 1.7: Schéma výroby braggovské mřížky metodou vnitřního zapisování.

### 1.5.2 Boční zapisování

U metody vnitřního zapisování jsme mohli vytvořit braggovskou mřížku, která však mohla mít vlnovou délku stejnou jako zapisovací laser. Abychom zajistili u mřížky jinou vlnovou délku než zapisovací můžeme použít metody bočního zapisování. Ta spočívá v použití rozdělovače paprsku na dva nezávislé paprsky, kdy je každý z nich přiveden na jedno UV zrcadlo. Takto přivedené paprsky jsou nasměrovány na boční stranu optického vlákna pod vzájemným úhlem  $2\varphi$ . Perioda mřížky je pak závislá na vlnové délce zdroje a na polovině úhlu mezi oběma paprsky, což můžeme vyjádřit vztahem

$$\Lambda = \frac{\lambda_W}{2 \sin \varphi} \quad (1.2)$$

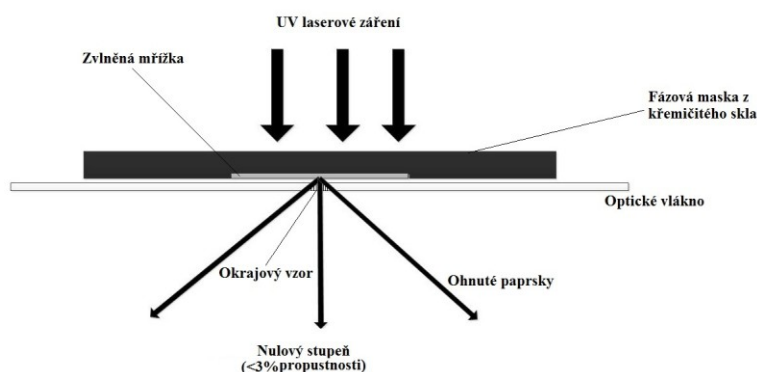
kde  $\lambda_W$  je UV vlnová délka zdroje.



Obrázek 1.8: Schéma použití bočního zapisování braggovské mřížky.

### 1.5.3 Metoda zapisování pomocí fázové masky

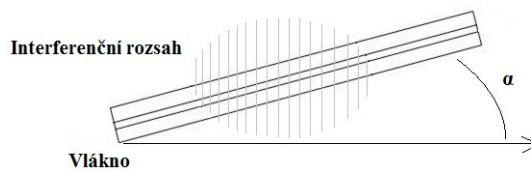
Patří mezi jednu z nejúčinnějších metod zapisování mřížky do jádra optického vlákna. Používá se optického prvku – fázové masky, která moduluje dopadající UV paprsek. Princip spočívá v tom, že UV paprsek, který dopadne na fázovou masku způsobí, že difrakční paprsek nultého řádu je téměř potlačen (ve skutečnosti se přeneso jen asi  $<3\%$ ) a paprsky  $\pm 1$  řádu jsou zesíleny až na cca  $35\%$ . Další výhodou fázové masky je, že lze umístit v jakémkoliv úhlu k vláknu. Tímto způsobem pak vznikají tzv. Blazed mřížky.



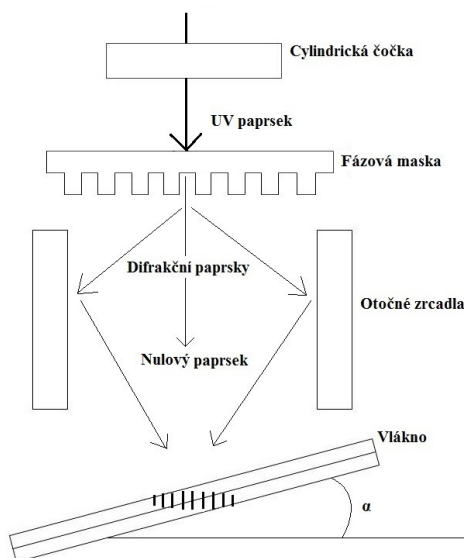
Obrázek 1.9: Princip výroby braggovské mřížky s použitím fázové masky.

### 1.5.4 Metoda šikmé mřížky

Pokud je optické vlákno nakloněno je mřížka zapsána do vlákna přímo ve směru propagace světla. Tato metoda však vyžaduje použití velkého příčného řezu tak, aby se interferující paprsky překrývaly (Obr. 1.10). Tento postup je však nevhodný pro většinu interferometrů. Místo toho se používá postup na obrázku 1.11, kde je použito dvou otočných zrcadel a nakloněním vlákna do menšího úhlu.



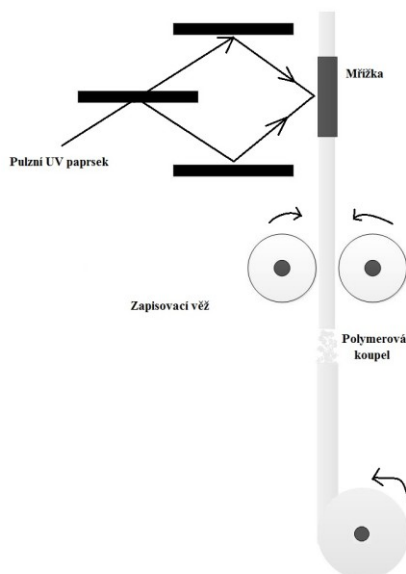
Obrázek 1.10: *Obscný způsob zapisování metodou šikmé mřížky.*



Obrázek 1.11: *Jednodušší způsob zapisování braggovské mřížky metodou šikmé mřížky.*

### 1.5.5 Metoda jednorázového zápisu mřížky

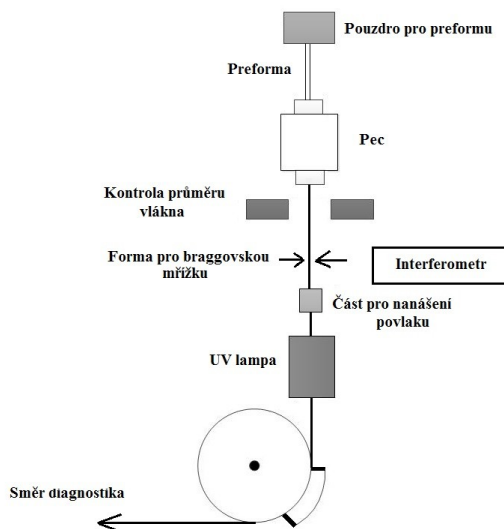
Princip spočívá v odizolování polymerového povlaku optického vlákna, které je neprůhledné pro krátké vlnové délky UV záření. Během zapisování mřížky do vlákna dochází k mechanickému poškození a tak je nezbytné okamžitě po vypalování vlákno znovu povléct. Tato metoda byla demonstrována pomocí excimerového laseru. Dále bylo využito bor-germaniových dopovaných vláken, která mají vyšší odrazivost. U této metody nebylo však dosaženo srovnatelných kvalit jako u jiných metod zapisování, avšak princip vedl k nové metodě a to k vytahování z preformy.



Obrázek 1.12: *Metoda jednorázového zápisu mřížky.*

### 1.5.6 Metoda zapisování během vytahování z preformy

Jednou z dalších možností, jak vytvořit v optickém vlákně braggovskou mřížku je už při její výrobě. K zapisování mřížky lze využít např. KrF laser s velikostí paprsku  $205\text{ mm}^2$ .



Obrázek 1.13: *Princip vytváření braggovské mřížky během vytahování z preformy.*

### 1.5.7 Metoda zapisování bod po bodu

Metoda využívá odrazivost mřížky při vlnové délce  $244\text{ nm}$ . Dochází k difrakčně omezeným místům o velikosti zhruba  $0.25\text{ }\mu\text{m}$  a tím se nabízí možnost vytvořit pravidelný index lomu mřížky osvětlením jediného místa. K dosažení se používá pozičních senzorů

připojených k interferometru. Toto nastavení je však vhodnější způsob pro zapisování krátkých mřížek.

## 1.6 Aplikace optických mřížek

Všechny druhy optických mřížek našli široké uplatnění v praxi. Obecně se dají mřížky jako senzory rozdělit do dvou skupin:

- 1) Senzory pro monitorovací činnosti – monitorování kritických parametrů v kritických místech (např. tlak, zrychlení, apod.), sledování napětí u mostních konstrukcí, vibrační senzory aj.
- 2) Senzory sledovacích aplikací – tyto senzory jsou používány pro měření velmi slabých signálů, a proto je nutná jejich vysoká citlivost. Příkladem budiž hydrofon, který však bylo náročné sestavit s klasických braggovských mřížek. Zlom přišel až s nástupem vláknových laserových senzorů s braggovskou mřížkou, které umožnily posun ve výrobě senzorů pro sledování aplikací.

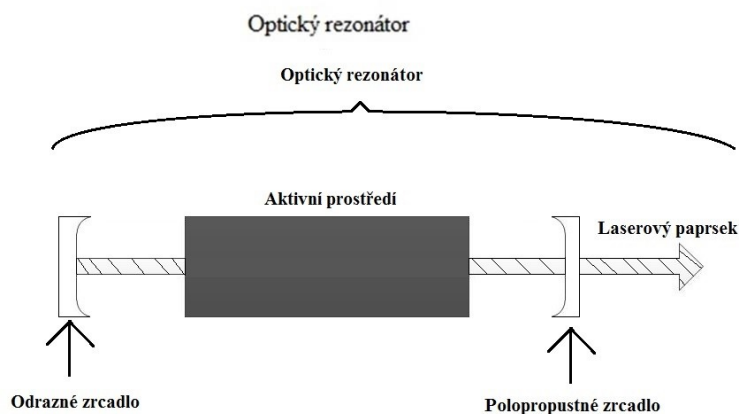
Za zmínku stojí také zmínit různé kombinace dvou předešlých typů senzorů, které našli uplatnění v lékařství a akustice. Mezi základní požadavky patří malá velikost senzoru a práce s vysokými frekvencemi (řádově MHz).

## 2 Popis principu funkce laditelného laseru

### 2.1 Laser

Laser (z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) je zařízení, které zesiluje světelný signál a produkuje směrový koherentní paprsek o vysoké intenzitě. Tento paprsek je často reprezentován pomocí signálu o určité frekvenci nebo vlnové délky. Průměr paprsku se velmi liší od několika nanometrů po desítky nm. Optický výkon jednotlivých paprsků se liší od použitého zařízení z pravidla bývá v rozmezí od  $10^{-9}$  do  $10^{20}$  W. Pro správnou činnost laseru je zapotřebí několika aspektů:

- a) Aktivní prostředí – dochází v ní k inverzi populace a stimulované emisi
- b) Dodávka energie
- c) Optický rezonátor



Obrázek 2.1: *Obecný princip laseru.*

Ze zdroje energie je do aktivního prostředí dodávána energie, která vybudí elektrony do vyšší energetické hladiny a tím vzniká inverze populace. Při zpětném přestupu do nižší energetické hladiny, elektron vyzařuje energii ve formě fotonů. Ty podporují další stimulovanou emisi. Díky umístění aktivního prostředí, které bývá nejčastěji umístěno mezi zrcadly dochází k zesílení paprsku. Nakonec dojde k vyzáření paprsku ven polopropustným zrcadlem za dodržení prahové podmínky[13].

### 2.2 Rozdělení laserů

Lasery mají v dnešní době velmi široké využití v mnoha odvětvích lidské činnosti. Obecně se lasery rozdělují podle aktivního prostředí. V dnešní době můžeme lasery rozdělit do těchto kategorií:

- 1) Lasery s pevným aktivním prostředím
- 2) Lasery s kapalným aktivním prostředím

- 3) Lasery s plynným aktivním prostředím
- 4) Další druhy laserů

Do speciální skupiny můžeme zařadit také masery, které fungují na podobném principu jako lasery s tím rozdílem, že generuje a zesiluje mikrovlnné elektromagnetické záření.

## 2.3 Laditelný laser

Laditelný laser umožňuje měnit výstupní vlnovou délku. V některých případech zejména pak u širokého ladícího rozsahu je požadován tj. široký rozsah dostupných vlnových délek, zatímco pak v dalších případech je dostačující, že vlnové délka laseru může být naladěna na určitou hodnotu. Některé jedno-frekvenční lasery mohou nepřetržitě měnit vlnovou délku přes celý svůj rozsah, zatímco jiné lasery mohou přistupovat pouze k vlnovým délkám diskrétně.

## 2.4 Základní typy laditelných laserů

Laditelné lasery pokrývají velké spektrum vlnových délek, které lze naladit např. pomocí počítače. Laditelnost jednotlivých laserů závisí na aktuální potřebě dané situace. Podle toho můžeme klasifikovat lasery do dvou kategorií:

- 1) Diskrétní ladění – je vyžadována jedna nebo více vlnových délek, větší doba pro přeladění
- 2) Průběžné ladění – souvislé a postupné přeladování vlnové délky odvislé od testu či experimentu (např. spektroskopie)

Existuje velké množství typů laditelných laserů s CW v nanosekundovém, pikosekundovém a femtosekundovém výstupu a také obrovský počet aktivních prostředí, které se v nich používají. Ačkoliv mají laditelné lasery mnoho rozličných vlastností, shodují se ve 2 základních rysech:

- a) Využívají aktivní prostředí, které dokáže emitovat vlnové délky daleko za použitelný rozsah
- b) Pro výběr konkrétní vlnové délky používají téměř shodných optických prvků

## 2.5 Laditelný laser EXFO FLS-2600B

V praktické části bakalářské práce byl použit laditelný laser od firmy EXFO. Jedná se o typ FLS-2600B, který používá vlnové délky v rozmezí 1510 až 1612 nm, jenž se přeladuje změnou teploty. Tento laser dovoluje nízko-spontánní hlukovou emisi, díky čemuž je ideálním zařízením pro testování jak nepropustných, tak propustných pásmových filtrů. V kombinaci s vlastnostmi koherentních zdrojů je nejlepším laditelným laserem na trhu pro charakterizaci pasivních DWDM prvků.

Další využití tohoto laseru je charakterizace multiplexerů, braggovských mřížek a dalších DWDM komponentů. Dokáže rovněž detekovat spektrální citlivost přijímačů a vysílačů nebo spustit test vysokých ztrát na pasivních komponentech.



Obrázek 2.2: EXFO FLS-2600B.

### 2.5.1 Některé vybrané parametry laditelného laseru FLS-2600B

Rozsah vlnové délky		1510 – 1612 nm
Spektrální šířka čáry		Typicky 1,3 GHz
Opakovatelnost	u 10 měření	$\pm 2,5$ pm
Stabilita	během 1 hodiny	$\pm 6$ pm
Vlnová rychlost	maximum	50 nm/s
	minimum	2 nm/s
Ladící čas		75 ms
Výstupní výkon	1515 -1610 nm	$\geq 0$ dBm
	1510-1612 nm	$\geq -10$ dBm
Útlumový rozsah		10 dB
Doba odezvy		0,5 s

Tabulka 2.1: Vybrané parametry laditelného laseru FLS-2600B.



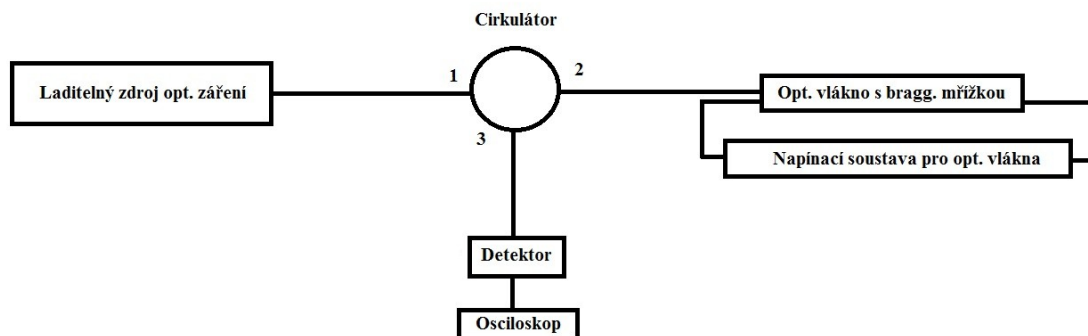
### 3 Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předeprnutí

#### 3.1 Ověření posunu spektra braggovské mřížky při různých předeprnutí

Cílem této části bakalářské práce bylo změřit spektrum braggovské mřížky s ohledem na dané předeprnutí. Z následných hodnot byl sestaven graf, který měl ukázat, jak se spektrum za daných podmínek chová. V naměřeném grafu byly také určeny hodnoty vlnových délek pro každé předeprnutí, které byly v následujícím měření použity.

##### 3.1.1 Schéma měření a použité součásti

- Laditelný laser EXFO FLS-2600B
- Cirkulátor
- Optické vlákno s braggovskou mřížkou o vlnové délce 1550 nm
- Napínací soustava pro optická vlákna se siloměrem
- Detektor
- Osciloskop
- Patchcordy s FC-FC a FC-SC konektory
- FC-FC spojky



Obrázek 3.1: Schéma měření posunu spektra.

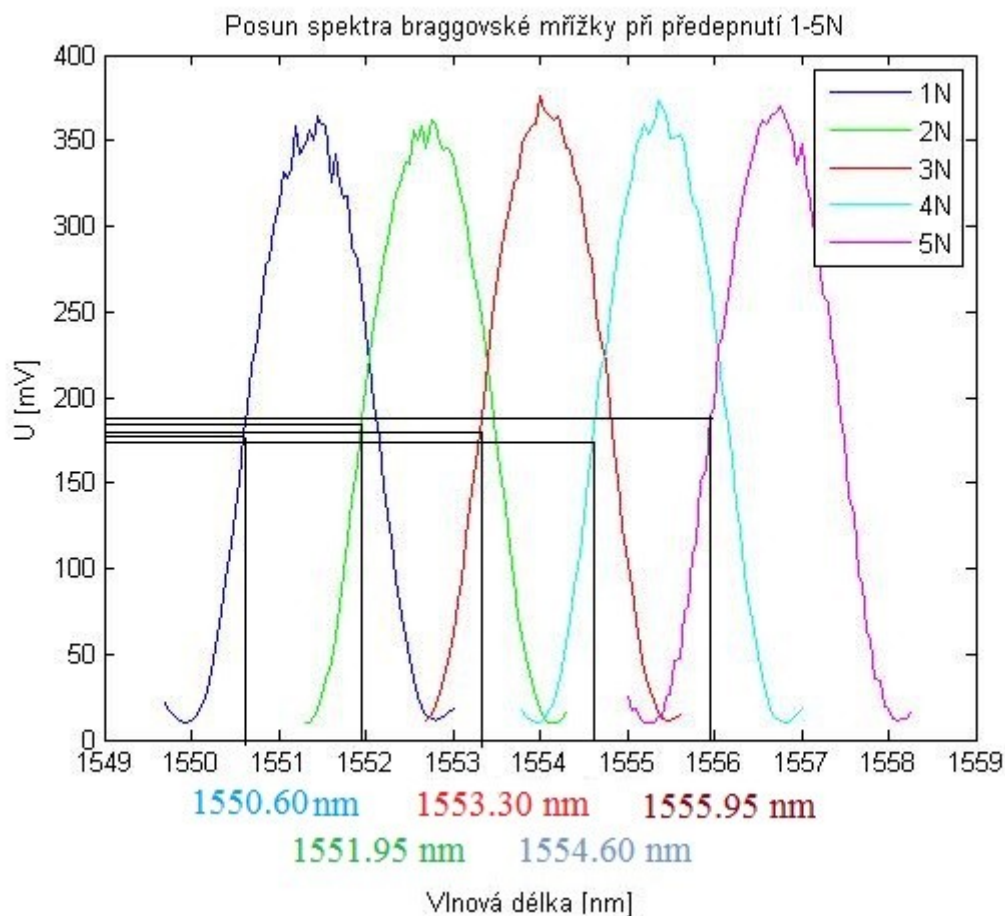
##### 3.1.2 Nastavené parametry a postup měření

Pro odměření této části bakalářské práce jsme postupovali podle obrázku 3.1. Následně jsme na napínací soustavě pro optická vlákna nastavili hodnotu pro dané měření a po spuštění laseru jsme postupně ladili vlnovou délku a sledovali odezvu na osciloskopu. Z odměřených

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

hodnot jsme následně v programu MATLAB vykreslili spektrum a přiřadili jednotlivým předepnutím konkrétní vlnovou délku, která byla použita v další části měření. Výsledný graf je pak na obrázku 3.2 a naměřené hodnoty byly vloženy do tabulky a jsou přiloženy v příloze.

### 3.1.3 Naměřené hodnoty a výsledné grafy



Obrázek 3.2: Posun spektra braggovské mřížky při různých předepnutích s vyznačením vlnových délek použitými k měření vibrací.

### 3.1.4 Závěr

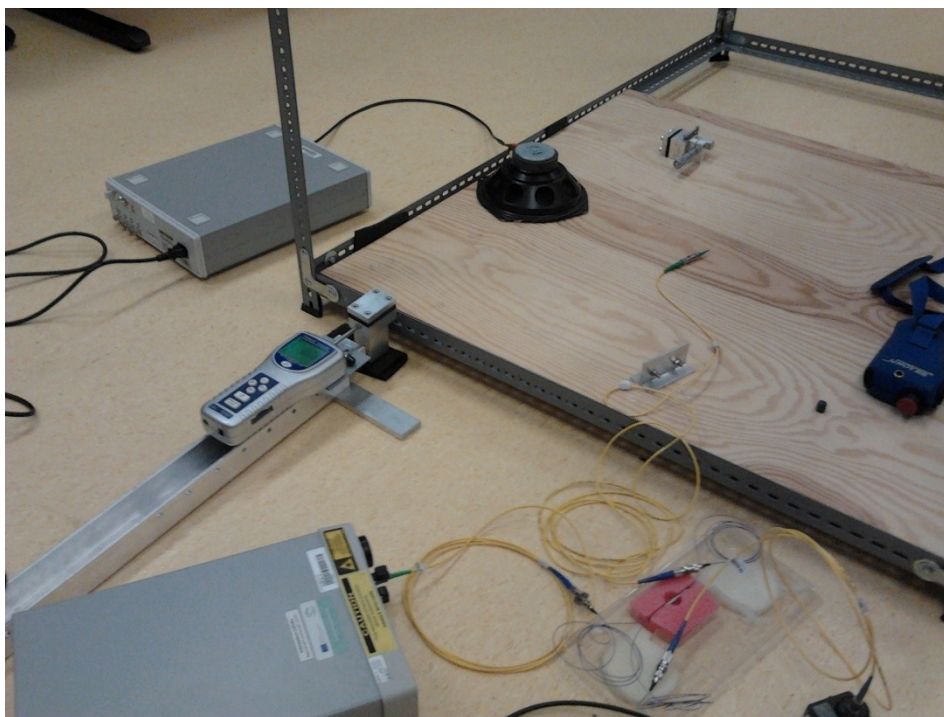
V tomto měření byl ověřen posun spektra FBG mřížky při různých předepnutích. V obrázku 3.2 jsou vykresleny průběhy pro jednotlivá měřená předepnutí a dále jsou zde vyznačeny vlnové délky použité pro následující měření vibrací. Tyto hodnoty vlnových délek odpovídají polovině náběžné hrany odraženého spektra braggovské mřížky.

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

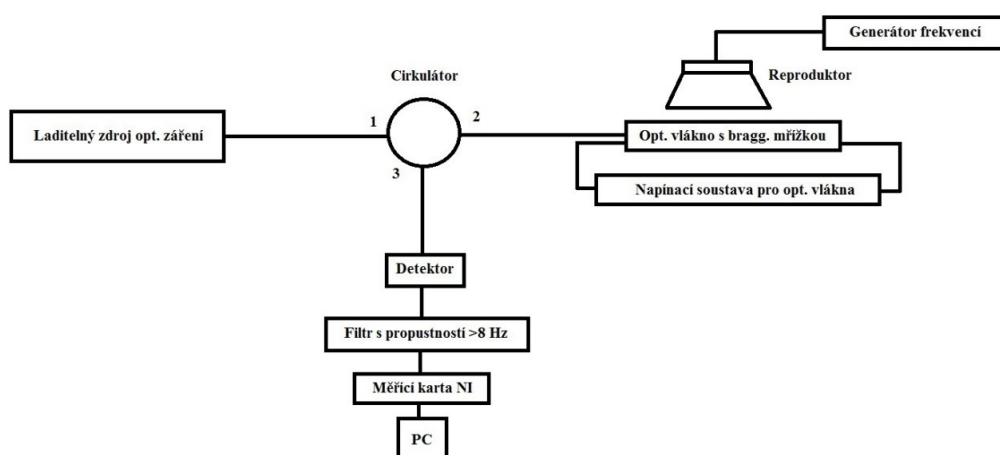
### 3.2 Měření vibrací pomocí braggovské mřížky v závislosti na předepnutí

Stěžejní částí práce bylo ověření citlivosti braggovské mřížky při různých hodnotách předepnutí. V následující kapitole je popsán postup a průběh tohoto měření a jsou zde vyvedeny výstupy v podobě grafů.

#### 3.2.1 Schéma měření a příprava pracoviště



Obrázek 3.3: Příprava pracoviště pro měření vibrací v laboratoři.



Obrázek 3.4: Schéma zapojení pro měření vibrací.

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

---

### 3.2.2 Použité součásti, postup měření

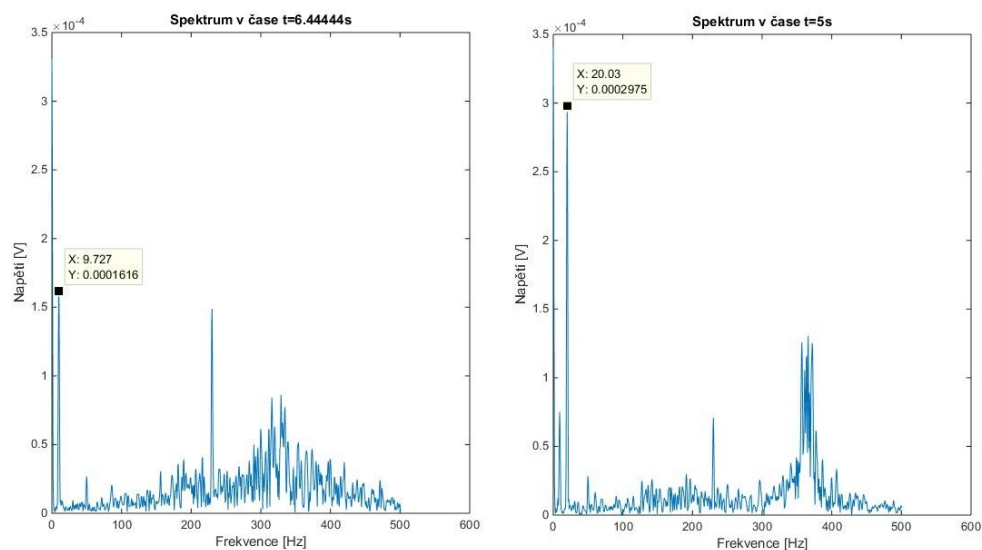
- Laditelný laser EXFO FLS-2600B
- Cirkulátor
- Optické vlákno s braggovskou mřížkou
- Napínací soustava pro optická vlákna se siloměrem
- Reproduktor
- Generátor frekvencí
- Detektor ThorLabs
- Filtr s propustností  $> 8$  Hz
- Měřicí karta NI
- Stolní počítač
- Patchcordy s FC-FC a FC-SC konektory
- FC-FC spojky
- Program LabView
- Program Matlab

Během měření jsme postupovali dle zapojení na obrázku 3.4. Pro každé měření jsme nejprve museli nastavit předepnutí a odpovídající hodnotu vlnové délky, kterou jsme změřili v předchozím měření. Na stolním počítači spustíme program LabView s virtuálním zapojením Manhattan a na generátoru frekvencí měníme frekvenci, která simuluje vibrace. V prostředí LabView jsme pak mohli sledovat kmitočtové spektrum. Naměřené hodnoty jsme si uložili a spustili jsme program MATLAB. Pomocí aplikace GUIv3\_7 jsme vykreslili spektrum a označili měřenou frekvenci. Takto jsme postupovali pro celý frekvenční rozsah a všechny měřené předepnutí.

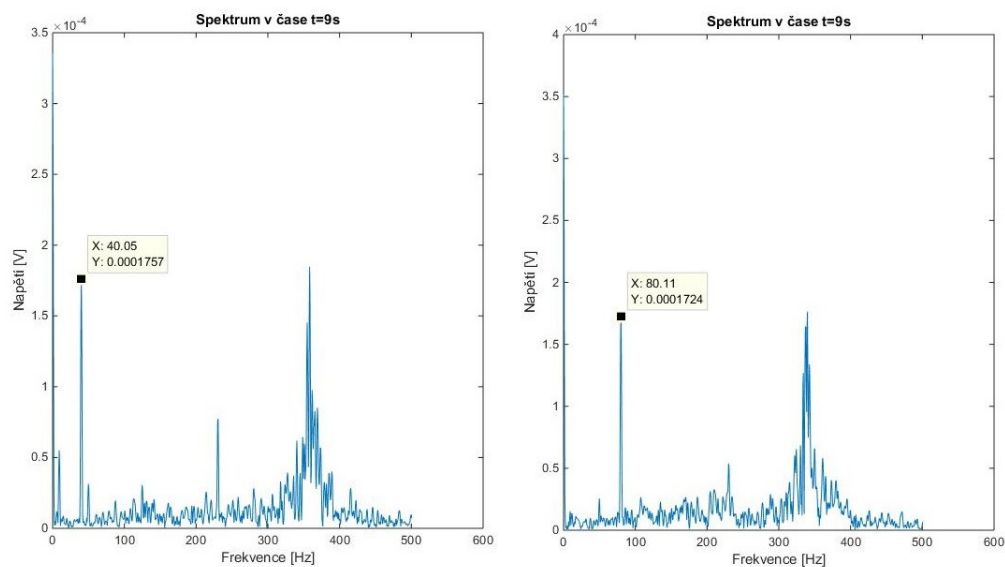
Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

### 3.2.3 Naměřené hodnoty, grafy

#### 3.2.3.1 Naměřené hodnoty při předepnutí 1 N



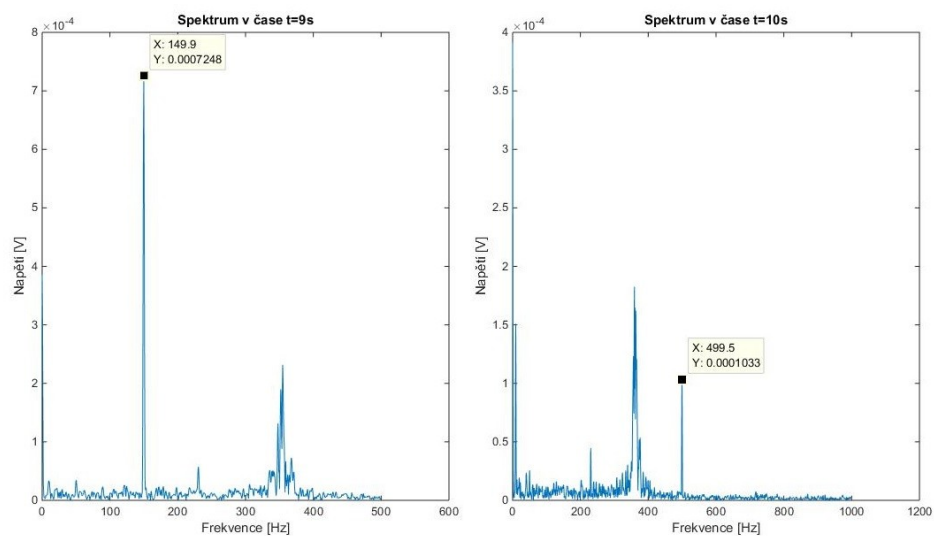
Obrázek 3.5: Frekvence a) 10 Hz b) 20 Hz



Obrázek 3.6: Frekvence a) 40 Hz b) 80 Hz

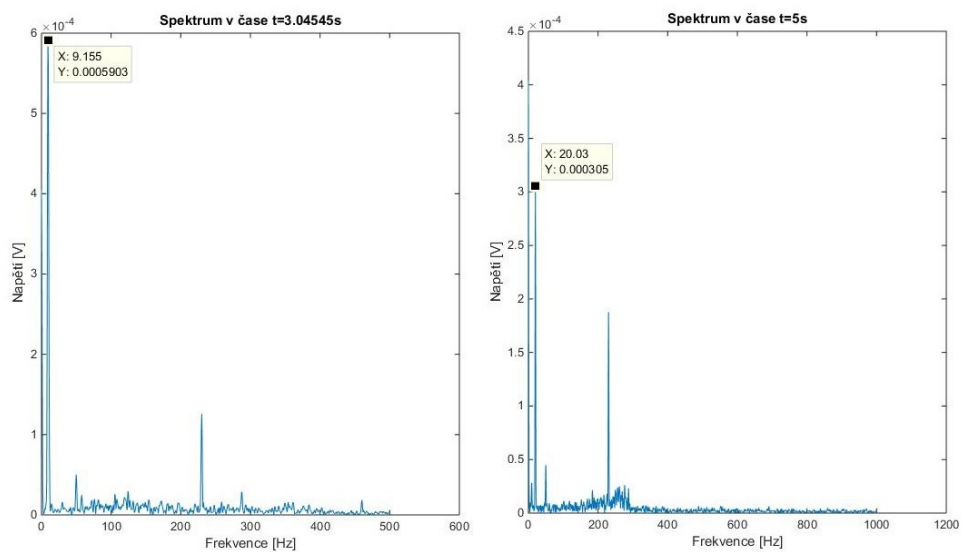
Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

---



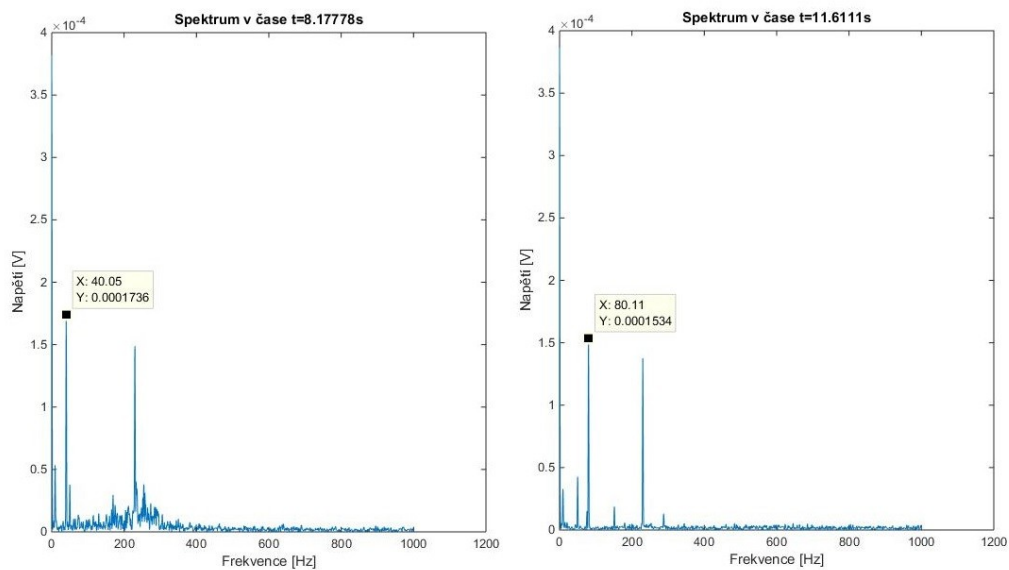
Obrázek 3.7: Frekvence a) 150 Hz b) 500 Hz

### 3.2.3.2 Naměřené hodnoty při předepnutí 2 N

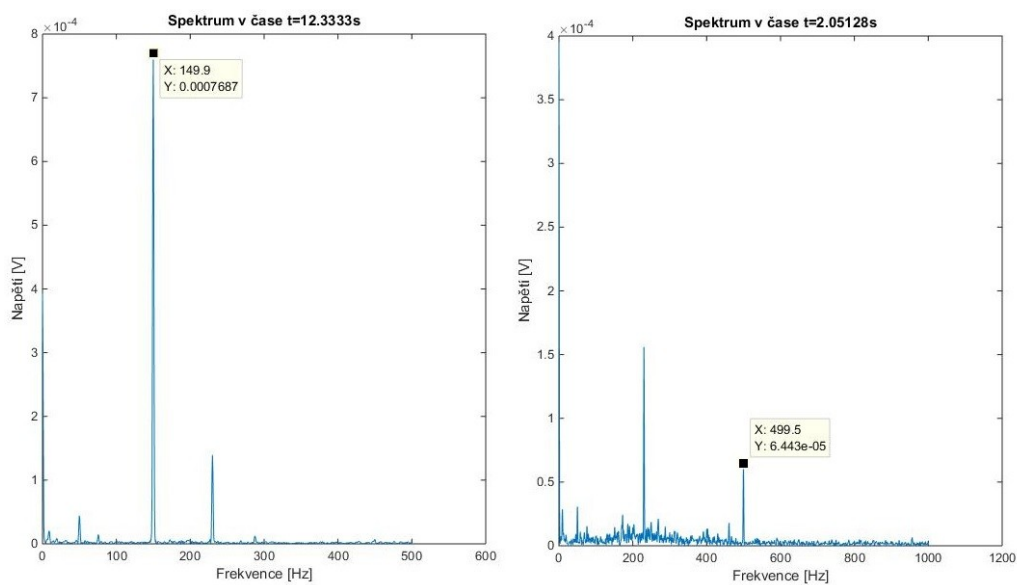


Obrázek 3.8: Frekvence a) 10 Hz b) 20 Hz

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí



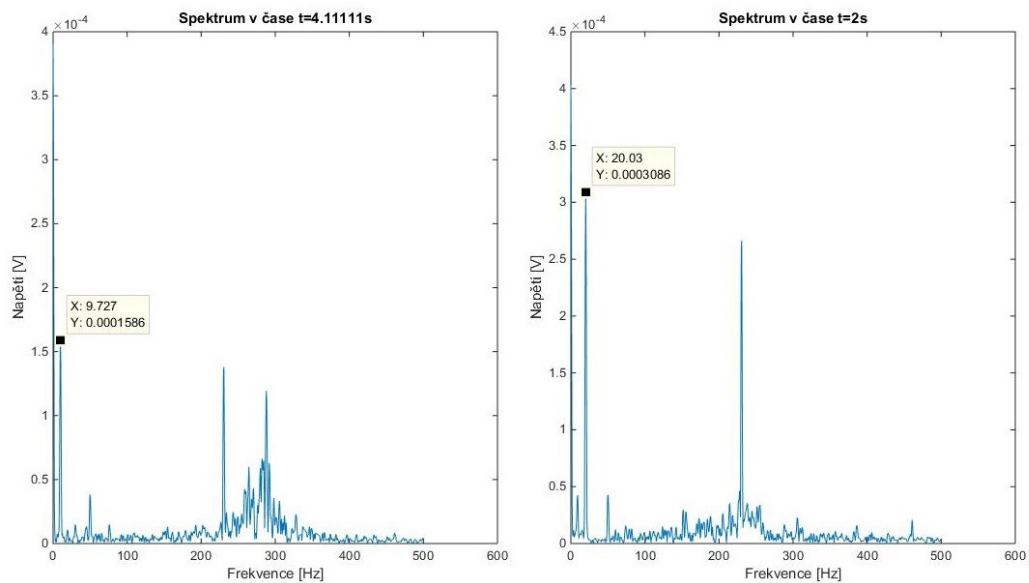
Obrázek 3.9: Frekvence a) 40 Hz b) 80 Hz



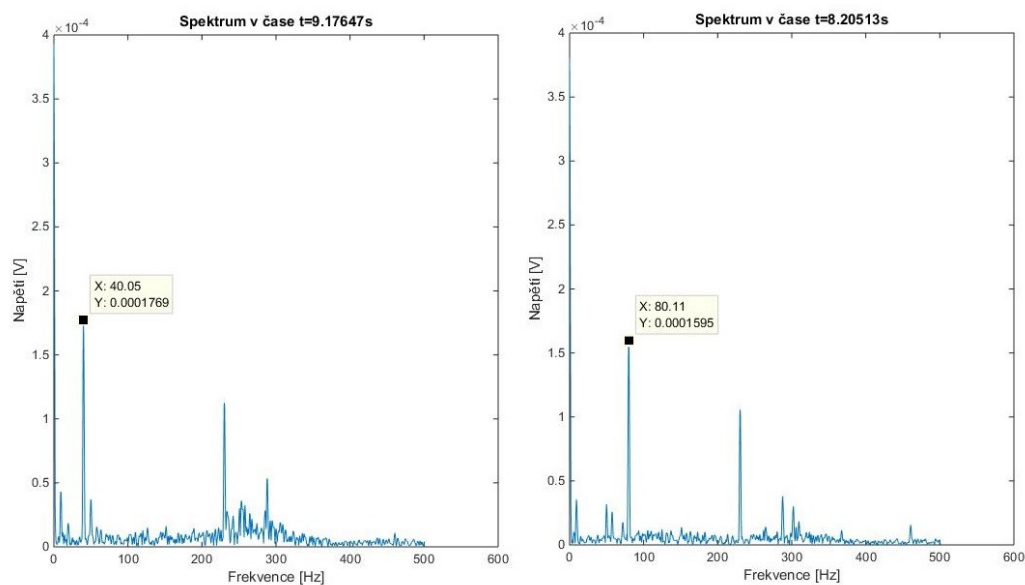
Obrázek 3.10: Frekvence a) 150 Hz b) 500 Hz

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

### 3.2.3.3 Naměřené hodnoty při předepnutí 3 N



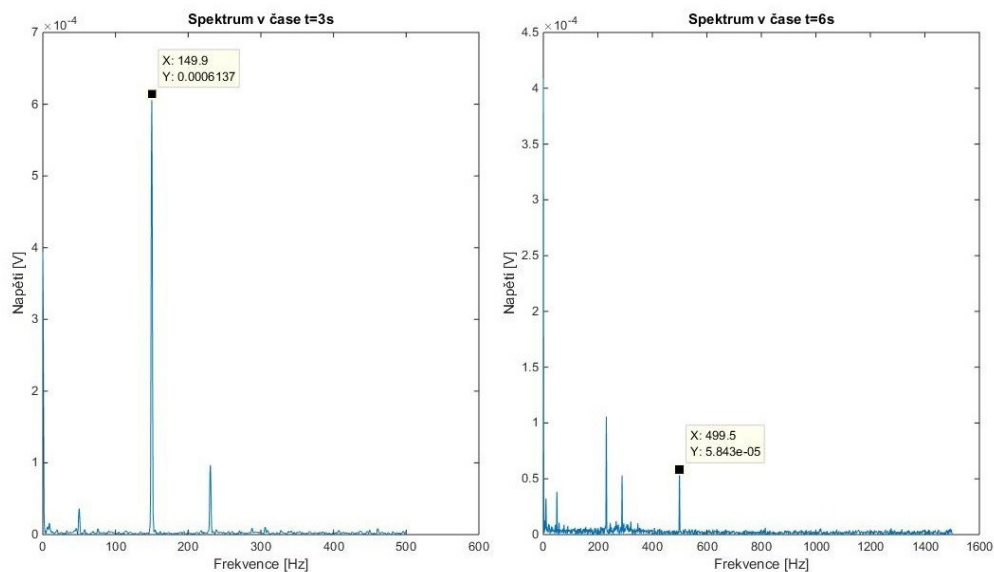
Obrázek 3.11: Frekvence a) 10 Hz b) 20 Hz



Obrázek 3.12: Frekvence a) 40 Hz b) 80 Hz

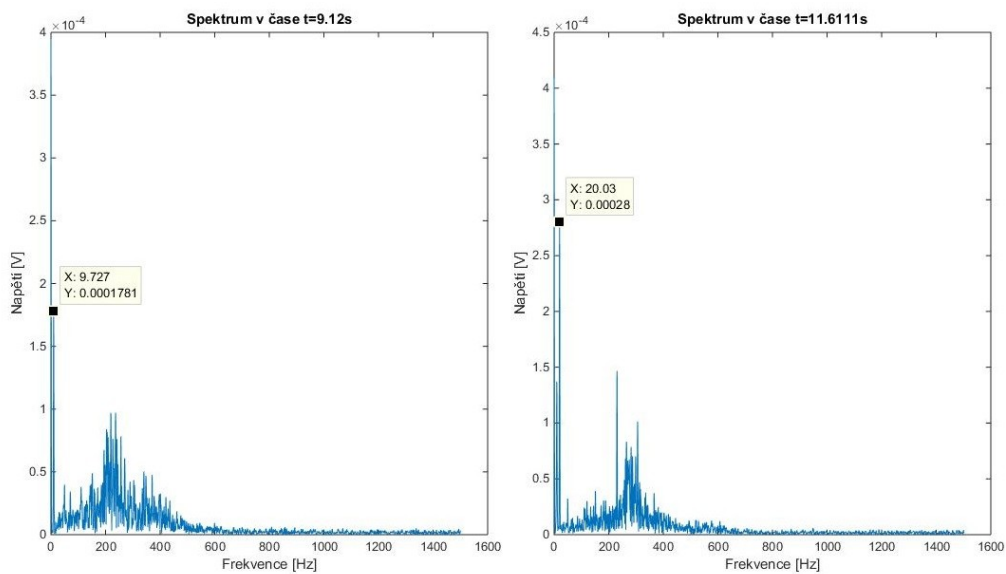


Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předeptnutí



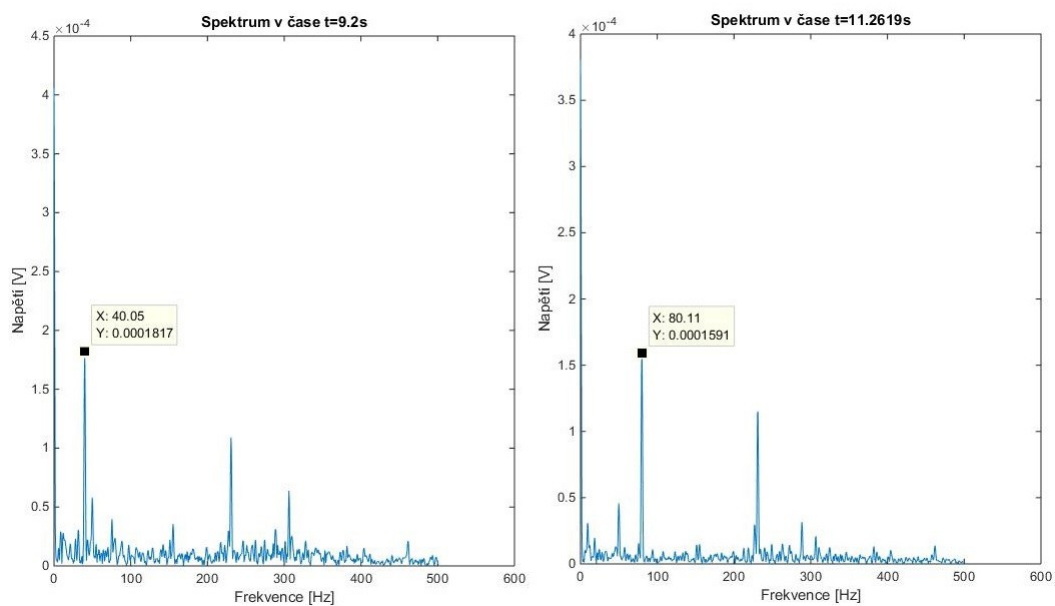
Obrázek 3.13: Frekvence a) 150 Hz b) 500 Hz

#### 3.2.3.4 Naměřené hodnoty při předeptnutí 4 N

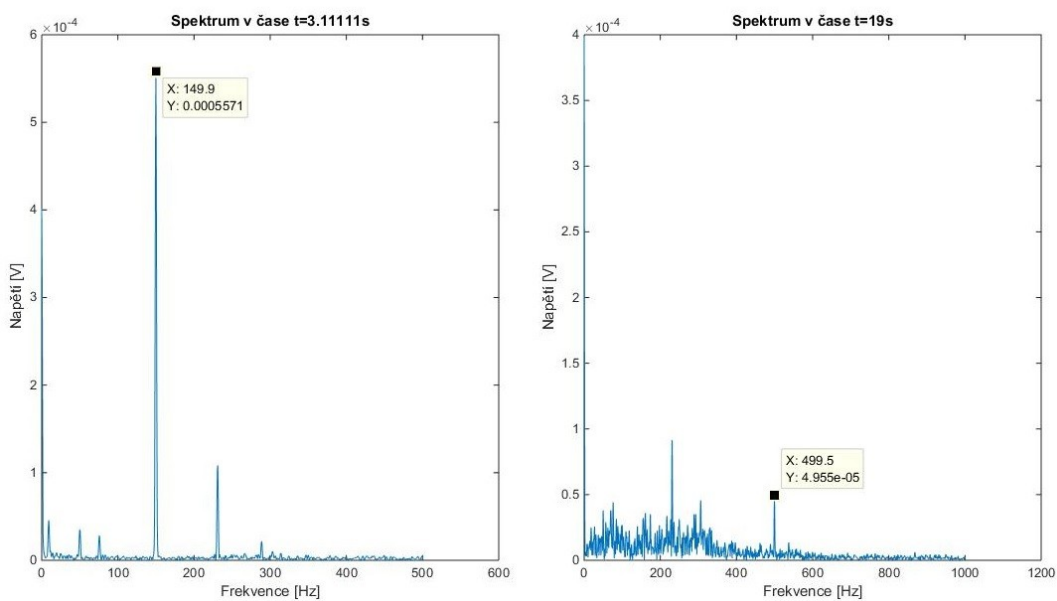


Obrázek 3.14: Frekvence a) 10 Hz b) 20 Hz

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí



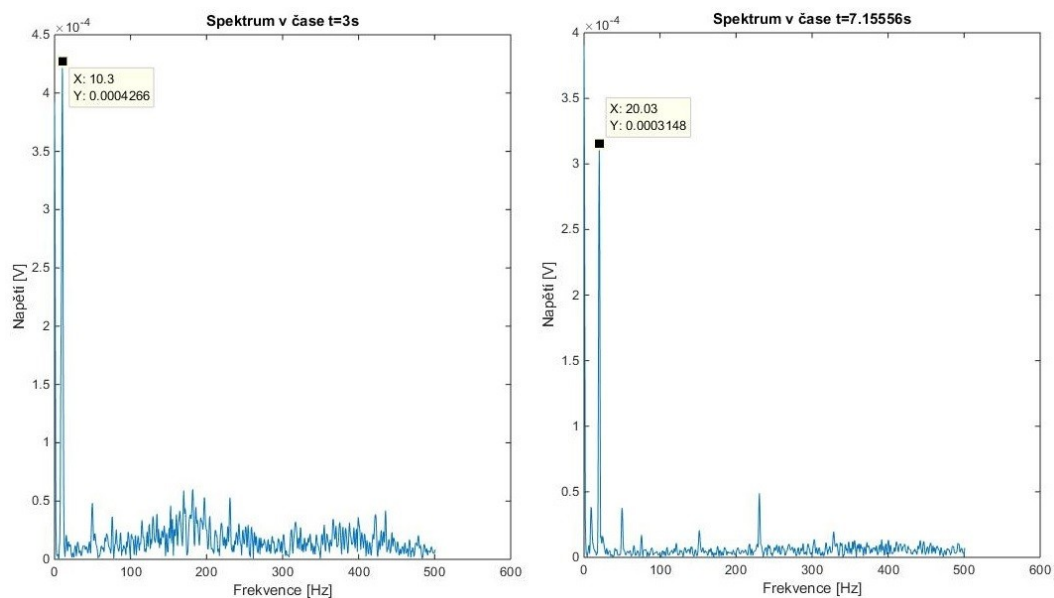
Obrázek 3.15: Frekvence a) 40 Hz b) 80 Hz



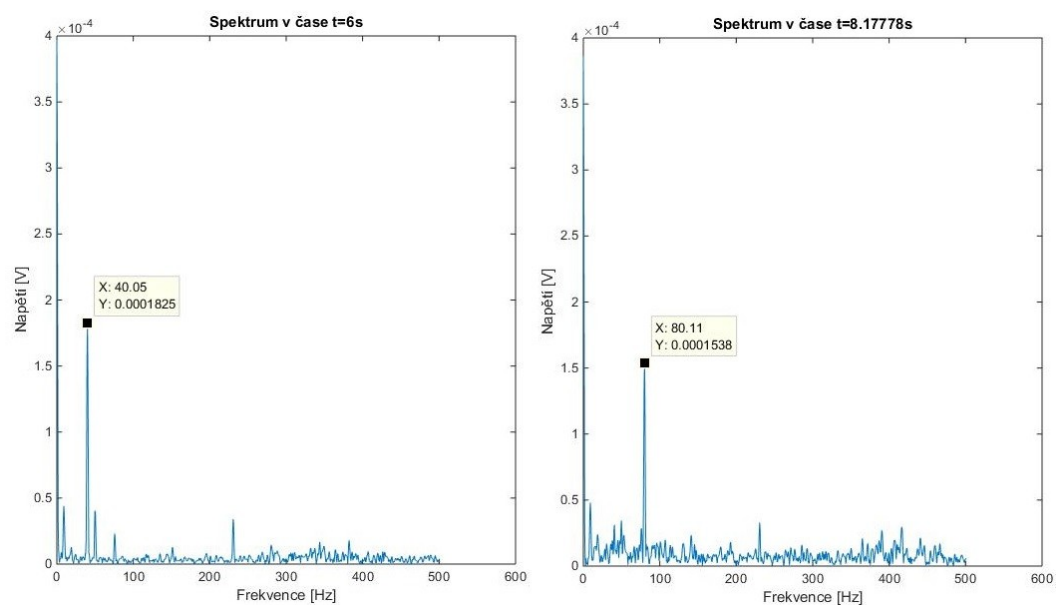
Obrázek 3.16: Frekvence a) 150 Hz b) 500 Hz

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí

### 3.2.3.5 Naměřené hodnoty při předepnutí 5 N

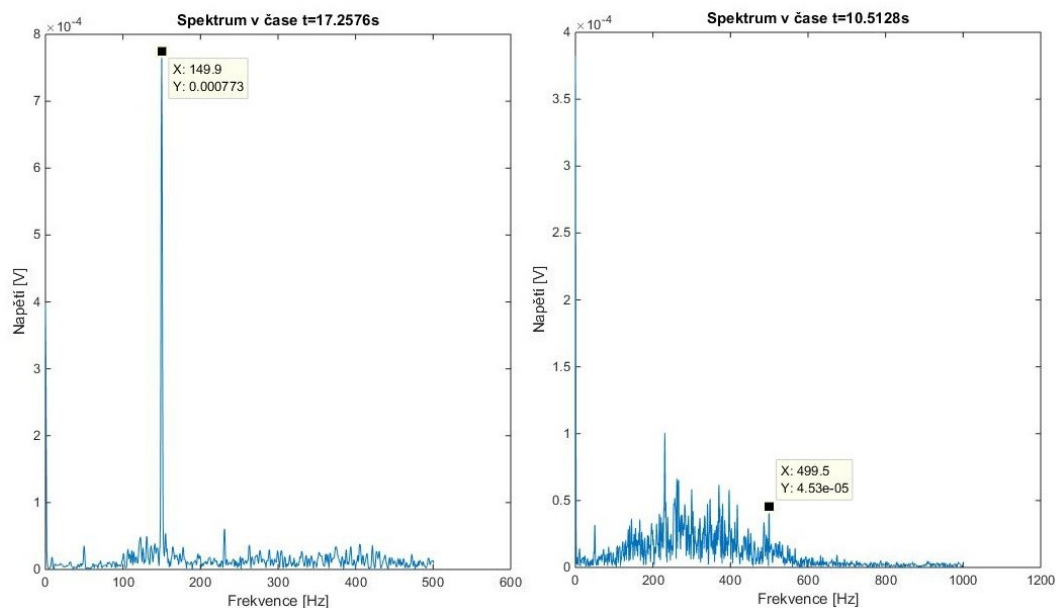


Obrázek 3.17: Frekvence a) 10 Hz b) 20 Hz



Obrázek 3.18: Frekvence a) 40 Hz b) 80 Hz

Realizace experimentální soustavy pro měření vibrací pomocí Braggovské mřížky v závislosti na různých hodnotách předepnutí



Obrázek 3.19: Frekvence a) 150 Hz b) 500 Hz

### 3.2.4 Závěr

Z přiložených obrázků lze vyčíst, že největší citlivost bragg. mřížky byla na měřené frekvenci 150 Hz, kde odezva měřená v elektrické doméně u předepnutí 5 N dosahovala téměř 770  $\mu\text{V}$ . Naopak nejméně citlivá byla mřížka na měřené frekvenci 500 Hz, kde byla odezva v řádech jednotek mikrovoltů.

U jednotlivých předepnutí také závisela odezva na rozsahu měření. U předepnutí 1 a 2 newtonů byly naměřeny hodnoty do 1000 Hz, přičemž poslední výrazná odezva byla kolem 500 Hz a poslední měřená 560 Hz. U měření 3 a 4 newtonů byl pak měřicí rozsah také do 1000 Hz s obdobnými výsledky. U měření s předepnutím 5 N pak byly naměřeny hodnoty do 500 Hz, ale frekvence vyšší než vlastní frekvence struny byly už nepatrné. Frekvence 500 Hz u tohoto předepnutí jako poslední vykazovala větší odezvu než předešlé vyšší frekvence.

## 4 Vyhodnocení experimentálních měření s ohledem na předepnutí mřížky

### 4.1 Odvození rovnice pro výpočet harmonických frekvencí

Vlastní výpočet pro harmonické frekvence vychází ze dvou následujících vzorců:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4.13)$$

kde  $l$  je délka vlákna a  $\lambda$  je vlnová délka  $n$ -tého kmitu struny

$$f_n = \frac{v}{\lambda} \quad (4.14)$$

kde  $v$  je rychlost šíření vlnění. V mém případě bylo nutno ještě do rovnice zakomponovat samotné předepnutí struny. Samotné předepnutí pak ovlivňuje rychlost šíření  $v$  a tuto rychlost pak lze vyjádřit vztahem:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot S}} = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4.15)$$

kde  $\rho$  značí hustotu materiálu struny,  $S$  pak v našem případě průřez optického vlákna a  $\mu$  hmotnost vlákna o jednotkové délce. V mém případě byl použit zjednodušený vzorec s hmotností vlákna, kterou jsem dosadil do výpočtů z tabulky. Výsledný vzorec pak vypadal následně:

$$f_n = \frac{n}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4.16)$$

Z výsledného tvaru rovnice lze vyčíst, že vlastní frekvence je závislá na délce předepnutého vlákna, předepnutí a hmotnosti daného vlákna. Během praktické části se pak měnila pouze hodnota předepnutí. Proměnná  $n$  nabývá celočíselných hodnot od 1 do 10 a ve výsledku pak dostáváme násobky frekvencí při daném předepnutí.

## 4.2 Porovnání naměřených hodnot od výpočtů

Předepnutí 1 N		
Frekvence [Hz]	Napětí [ $\mu$ V]	Špička frekvence [Hz]
10	161.6	9.727
20	297.5	20.03
40	175.7	40.05
80	172.4	80.11
150	724.8	149.9
500	103.3	499.5

Tabulka 4.1: *Citlivost měřených frekvencí v závislosti na předepnutí 1 N*

Z tabulky naměřených hodnot můžeme zjistit, že nejcitlivější naměřenou frekvencí byla frekvence na 150 Hz. Naopak nejméně citlivou frekvencí byla hodnota 500 Hz. Z měřeného rozsahu, který dosahoval až k 1 kHz nám vyšly tyto frekvence s největší odezvou. Ve spektrech u jednotlivých měření pak můžeme vidět i velké odezvy na frekvencích cca 230 Hz a 340 Hz. Podle vypočítaných hodnot harmonických frekvencí se jednalo určitě o harmonické frekvence. Vyšší měřené frekvence pak neměly takovou odezvu, které by stála za zmínku.

Předepnutí 2 N		
Frekvence [Hz]	Napětí [ $\mu$ V]	Špička frekvence [Hz]
10	590.3	9.155
20	305.0	20.03
40	173.6	40.05
80	153.4	80.11
150	768.7	149.9
500	64.43	499.5

Tabulka 4.2: *Citlivost měřených frekvencí v závislosti na předepnutí 2 N*

Jasně dominantní frekvencí u tohoto předepnutí byla opět frekvence 150 Hz, která se vyznačovala velkou odezvou na výstupu. Avšak i frekvence 10 Hz zaznamenala u tohoto typu měření daleko větší odezvu než u předepnutí 1 N. Další velmi výraznou frekvencí ve spektru u tohoto předepnutí byla hodnota 230 Hz, která podle výpočtů odpovídá 2.harmonické frekvenci. U měřené frekvence 500 Hz se ve spektru objevila ještě harmonická frekvence 476 Hz. Špičky měřených frekvencí se pak od nastavených hodnot na generátoru lišily jen nepatrně.

Předepnutí 3 N		
Frekvence [Hz]	Napětí [ $\mu\text{V}$ ]	Špička frekvence [Hz]
10	158.6	9.727
20	308.6	20.03
40	176.9	40.05
80	159.5	80.11
150	613.7	149.9
500	58.43	499.5

Tabulka 4.3: *Citlivost měřených frekvencí v závislosti na předepnutí 3 N*

Jako v předchozích případech i u předepnutí 3N jasně dominovala při měření frekvence 150Hz, ačkoliv již ne tolik jako v předchozích případech. U nejvyšší měřené frekvence jsme pak mohli pozorovat klesající hodnotu napětí. Zde se u několika případů objevila harmonická frekvence na 291 Hz. Jiné harmonické frekvence pak nebyly příliš výrazné. Tradičně u naměřených špiček byla shoda téměř totožná.

Předepnutí 4 N		
Frekvence [Hz]	Napětí [ $\mu\text{V}$ ]	Špička frekvence [Hz]
10	178.1	9.727
20	280.0	20.03
40	181.7	40.05
80	159.1	80.11
150	557.1	149.9
500	49.55	499.5

Tabulka 4.4: *Citlivost měřených frekvencí v závislosti na předepnutí 4 N*

U předepnutí 4 N došlo k nejmenšímu zaznamenání odezvy u frekvence 150 Hz, která se vždy pohybovala v předchozích případech okolo 700 mikrovoltů. I v tomto měření jsme sledovali pokles napětí u frekvence 500 Hz. Z toho lze usoudit, že vyšší měřené frekvence než vlastní frekvence struny, která se pohybovala opět okolo 230 Hz, nejsou tak citlivé jako frekvence nižší. Ohledně harmonických frekvencí jsme se zde mohli setkat nejčastěji s frekvencemi 168 a 336 Hz. Velmi pěkně lze tyto špičky harmonických frekvencí sledovat u měřené frekvence 80 Hz. Naměřené špičky pak byly totožné se špičkami u předešlého předepnutí.

Předepnutí 5 N		
Frekvence [Hz]	Napětí [ $\mu$ V]	Špička frekvence [Hz]
10	426.6	10.3
20	314.8	20.03
40	182.5	40.05
80	153.8	80.11
150	773.0	149.9
500	45.3	499.5

Tabulka 4.5: *Citlivost měřených frekvencí v závislosti na předepnutí 5 N*

U posledního předepnutí bylo naměřeno daleko větší napětí u frekvence 10 Hz. Také ve spektru u této naměřené frekvence jasně dominovala v porovnání s ostatními. Naopak u spektra měřené frekvence 500 Hz docházelo k zašumění měřené hodnoty. U tohoto měření jsme také mohli ve spektrech pozorovat harmonické frekvence. Jednalo se o hodnoty 188 a 376 Hz. Nejlépe pozorovatelné byly ve spektrech měřených frekvencí 40 a 80 Hz.



## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ověřit, jak optické vlákno s bragg. mřížkou citlivé na odezvu vzhledem k předeptnutí vlákna. V teoretické části práce je zahrnutý obecný popis vlákna s optickou mřížkou. Dále je tento fakt obohacen o popis mřížek FBG a LPG s důrazem na FBG mřížky. V další části byl obecně popsán laser jako zdroj koherentního optického záření. Následně rozdělen podle typů aktivního prostředí. Pro naše měření byl kladen důraz na popis laditelných laserů a jejich použití v praxi.

Při řešení soustavy pro měření vibrací byl nejprve ověřen fakt, že se spektrum FBG mřížky vlivem mechanického namáhání posunuje k vyšší vlnové délce. Ve výsledku byl posun u největšího mechanického napnutí 5 newtonů o téměř 7 nanometrů. Toto měření pak bylo nezbytné pro vlastní realizaci soustavy pro měření vibrací.

Ve vlastním měření vibrací pak bylo zjištěno, že některé frekvence při daném předeptnutí mají na mřížce daleko vyšší odezvu než frekvence jiné. Obecně lze říci, že nižší frekvence do vlastní frekvence struny měly ve spektru vyšší odezvu než frekvence vyšší. Musíme však podotknout, že měření byla prováděna i na vyšších frekvencích, než uvedených v této práci, ale pro svou nejednoznačnost měřené frekvence ve spektru nebyly zde uvedeny. Nejcitlivější měřenou frekvencí pak byla ve všech případech předeptnutí frekvence 150 Hz, kde byla odezva v průměru 700 mikrovoltů. Naopak nejméně citlivou frekvencí byla naměřena na 500 Hz, kde se stupňujícím předeptnutím odezva na frekvenci slábala. S konečnou platností lze pak říci, že závislost předeptnutí u FBG má svůj vliv na měření vibrací.

Z kapitoly o vyhodnocení výsledků měření vyplývá, že v naměřených spektrech jsme v některých případech kromě měřených frekvencí pozorovali i harmonické frekvence. Ve spektrech se vyskytly i frekvence, které neměly s měřením nic společného. Lze usoudit, že se mohlo jednat o vedlejší vlivy v laboratoři. Ze vzorce pro výpočet harmonických frekvencí byla zanedbána elasticita polymeru, která tvořila primární ochranu optického vlákna. To mohlo zapříčinit menší odchylky vypočítaných hodnot od těch naměřených.

Díky této práci jsem poznal oblast senzoriky a využití optických vláken nejen v komunikacích, ale i v nekomunikačních aplikacích více do hloubky. Určitě mě toto téma velmi zaujalo a stálo by za to pokračovat v dalším studiu této tematiky i v magisterském studiu.

## Použitá literatura

- [1] WEBER, M. J. *Handbook of Lasers* (Laser & Optical Science & Technology). CRC Press, 2000. 1224 p. ISBN 978-0849335099.
- [2] OTHONOS, Andreas, KALLI, Kyriacos. *Fiber Bragg Gratings*. Artech House, 1999. 433 p. ISBN 978-0890063446.
- [3] CHANG, W. S. C. *Principles of Lasers and Optics*. Cambridge University Press, 2007. 260 p. ISBN 978-0521645355.
- [4] KASHYAP, Raman. *Fiber Bragg gratings*. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press c2010, 614 p. ISBN 978-0-12-372579-0.
- [5] FAJKUS, Marcel. *Optoelektronika v telekomunikacích a senzorice* [online]. c2014, <http://opte.imatte.cz/>.
- [6] BROŽOVIČ, Martin, ŠIŠKA, Petr. *Bragg Fiber Grating for Vibration Detection*. VŠB-TU Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Bakalářská práce, 2012.
- [7] JAMES, Stephen, TATAM, Ralph. *Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application* [online]. Institute of Physics Publishing, 2003, <http://iopscience.iop.org/0957-0233/14/5/201/>.
- [8] *Tunable laser source – FLS-2600B datasheet* [online]. Dostupné z: <http://www.exfo.com/products/rdmanufacturing-testing/bu3-optical/light-sources-amplifiers/fls-2600b>.
- [9] Spectra-Physics a Newport company. *Tunable lasers* [online]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25043>.
- [10] ŠIŠKA, P., BROŽOVIČ, M., ČUBÍK, J., KEPÁK, S., VITÁSEK, J., KOUDELKA, P., LÁTAL, J., VAŠINEK, V. *Fiber Bragg Grating vibration sensor with DFB laser diode*. VŠB-TU Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Proceedings of SPIE. Volume 8697, SPIE, 2012, strany 1-9, 978-0-8194-9481-8.
- [11] GRILL, F. *Fyzikální praktikum – elektronická podpora výuky* [online]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Bakalářská práce, 2010, Dostupné z: <http://home.pf.jcu.cz/~kriz/>.
- [12] Laser. Wikipedia [online]. 2015 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>.

## Seznam příloh

Příloha A: Vypočítané hodnoty ..... I

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

- Namerene\_hodnoty.xlsx
- BP\_STO0042.pdf

---

Příloha A: *Vypočítané hodnoty*

Tabulka A.1: *Vypočítané hodnoty harmonických frekvencí*

fn [Hz]	F=1N	F=2N	F=3N	F=4N	F=5N
f1	84.2	119.1	145.9	168.5	188.4
f2	168.5	238.3	291.8	336.9	376.7
f3	252.7	357.4	437.7	505.4	565.1
f4	337.0	476.5	583.6	673.9	753.4
f5	421.9	595.6	729.5	842.4	941.8
f6	505.4	714.8	875.4	1010.8	1130.2
f7	589.7	833.9	1021.3	1179.3	1318.5
f8	673.9	953.0	1167.2	1347.8	1506.9
f9	758.1	1072.2	1313.1	1516.3	1695.2
f10	842.4	1191.3	1459.0	1684.7	1883.6